

# シリコン二次元系におけるサブバンド操作と電気伝導特性

著者	新井田 佳孝
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第2679号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/56926">http://hdl.handle.net/10097/56926</a>

氏名・(本籍)	に い だ よ し た か 新井田 佳 孝
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2 6 7 9 号
学位授与年月日	平 成 24 年 3 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	シリコン二次元系におけるサブバンド操作と電気伝導特性
論文審査委員	(主査) 教 授 須 藤 彰 三 教 授 平 山 祥 郎 教授(客) 山 口 浩 司 准教授 越 野 幹 人 准教授 遊 佐 剛

## 論 文 目 次

### 第 1 章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 本論文の構成
- 1.3 記号一覧

### 第 2 章 Si MOSFET 中に形成される二次元系の基本特性

- 1.1 はじめに
- 1.2 バルク Si のバンド構造
- 1.3 Si MOSFET, Si 量子井戸中の二次元電子系・正孔系
- 1.4 二次元系の磁場応答
- 1.5 Si 中の二次元系のバンド構造
- 1.6 まとめ

### 第 3 章 ダブルゲート Si SOI MOSFET の作製と測定方法

- 1.1 はじめに
- 1.2 試料作製
- 1.3 測定に用いた試料
- 1.4 実験装置, 測定方法
- 1.5 まとめ

### 第 4 章 ダブルゲート Si SOI MOSFET の室温動作

- 1.1 はじめに
- 1.2 測定手法, 測定条件
- 1.3 室温での動作特性
- 1.4 まとめ

## 第5章 低温領域での谷分離の観測と界面が移動度に与える影響

- 1.1 はじめに
- 1.2 谷分離と界面ポテンシャル
- 1.3 二次元電子系の移動度
- 1.4 電子移動度と正孔移動度の比較
- 1.5 まとめ

## 第6章 面内磁場によるスピン分離と谷分離の共存状態におけるサブバンド構造

- 1.1 はじめに
- 1.2 スピン・谷サブバンド操作についてのこれまでの研究
- 1.3 谷分離とスピン分離の共存状態におけるサブバンド状態の相図
- 1.4 伝導特性による相図の評価
- 1.5 まとめ

## 第7章 二次元電子系の金属絶縁体相転移とサブバンド構造

- 1.1 はじめに
- 1.2 金属絶縁体相転移に関する背景
- 1.3 測定結果
- 1.4 Two-parameter scaling の適用
- 1.5 まとめ

## 第8章 垂直磁場に対する二次元正孔系の応答とその閉じ込め電界依存性

- 1.1 はじめに
- 1.2 Rashba スピン軌道相互作用のゲートによる操作に関するこれまでの報告と本研究の意義
- 1.3 垂直磁場を印加した際の Landau 準位の閉じ込め電界依存性
- 1.4 サブバンドの閉じ込め依存性を仮定したモデルによる評価
- 1.5 現在報告されている正孔の有効質量
- 1.6 正孔の Landé  $g$  因子  $g^*$  と閉じ込め電界依存性パラメータ  $\gamma_R$
- 1.7 まとめ

## 第9章 総括

## 第10章 研究成果

- 1.1 論文発表
- 1.2 国際会議
- 1.3 国内会議
- 1.4 シンポジウム等

## 付録

## 参考文献

# 論文内容要旨

本研究では、これまで作製が困難であった  $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$  量子井戸構造を用い、二次元電子系、正孔系のサブバンドの閉じ込めポテンシャル依存性や、それを活かした物性の探求を行った。 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$  量子井戸構造を持つ試料は、二次元系が形成される量子井戸層の表面側と裏面側にそれぞれ、酸素雰囲気中の熱酸化によって形成される熱酸化膜層、酸素イオン注入後の高温アニールによって形成される埋め込み酸化膜(Buried Oxide, BOX)層を持ち、試料表面と裏面にそれぞれ独立に制御できるゲート電極を取り付けることができる。このため、キャリア密度とポテンシャルの非対称性を独立に操作することを可能にし、さらに  $\text{SiO}_2$  が良い絶縁膜であるためにゲート電極に高電圧を印可することができる。量子井戸を形成しているホールバーのそれぞれの端子の先端に  $n$  型と  $p$  型のオーミックコンタクトを取り付け、単一の量子井戸で電子系と正孔系を形成できるようにした。このような特徴を持つ試料を用い、以下のテーマについて研究を行った。テーマを大きく2つに分け、1) 二次元電子系の谷分離とそれに関する研究、2) 二次元正孔系の閉じ込め電界によるサブバンド操作に関する研究、とする。

## 1-1) 二次元電子系の谷分離と $\text{Si}/\text{SiO}_2$ 界面ポテンシャル

谷縮退は、 $\text{Si}$  のバンド構造が間接ギャップであり、電子系が  $X$  点近傍に存在することに起因する自由度で、(100) $\text{Si}$  中の二次元電子系は2重のスピンの縮退と2重の谷縮退を持つ。この谷縮退が  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面付近において分離することが知られており、谷分離と呼ばれている。これまで数  $\mu\text{eV}$  ~ 数  $\text{meV}$  程度の谷分離が報告されていた。しかし、 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$  量子井戸中の二次元電子系では、 $\text{Si}/\text{BOX}$  界面において数十  $\text{meV}$  の巨大な谷分離が発生し、閉じ込め電界の強度を変調することによってそれを操作できることが報告された。しかしそのメカニズムは理解されていない。この報告は谷分離と  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面の関連性を強く示唆したが、これまで巨大谷分離と  $\text{Si}/\text{BOX}$  界面の特性について報告した例はない。また、 $\text{Si}/\text{BOX}$  界面においては電子移動度が大幅に抑制されることが知られており、電子系を用いた界面の評価はその目的を果たさないと考えられる。

本研究では巨大谷分離がみられる  $\text{Si}/\text{BOX}$  界面と通常の  $\text{Si}/\text{熱酸化膜}$  界面を、谷自由度を持たない二次元正孔系を用いて評価し、電子系の谷分離と  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面の関連性を評価した。電子系は過去に報告されているような  $\text{Si}/\text{BOX}$  界面における移動度の抑制を見せたが、正孔系は  $\text{Si}/\text{BOX}$  界面において移動度が高かった。これらの領域では、主たる散乱因子が  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面における表面ラフネス散乱であることを確認している。この結果は  $\text{Si}/\text{BOX}$  界面の表面ラフネス散乱が  $\text{Si}/\text{熱酸化膜}$  界面に比して少ないことを示しており、そのような界面で電子系の谷分離が増幅され、谷分離自体によって電子移動度が抑制されていることを示している。

## 1-2) 面内磁場によるスピン分離と谷分離の共存状態におけるサブバンド構造と伝導特性

本研究で用いた試料では過去の報告に比べて大幅な谷分離の操作が可能である。また、二次元電子系に対して面内方向に磁場を印加することでスピン分離を起こすことができる。二次元電子系の電気伝導特性は状態密度やサブバンド端に存在する局在準位等の影響を含んだサブバンド構造を強く反映したものとなることが予想できるが、これまで谷分離とスピン分離の共存する系における電気伝導特性は知られておらず、電気伝導特性が単純なサブバンド構造から予想されるものと一致するのか不明であった。

本研究では、量子井戸の閉じ込め電界の変調による谷分離の操作と同時に、28 T まで印可可能な常伝導抵抗磁石を用いてスピン分離を操作しながら伝導特性を測定した。伝導特性においては、サブ

バンド端の局在準位や新たなサブバンドを占有する際の抵抗の急峻な変化によってサブバンド構造を把握することができるが、測定から得られた谷分離やスピン分離を操作した場合のサブバンド端の位置は、サブバンド構造から予想されたモデルで説明できることが分かった。

### 1-3) 二次元電子系の金属絶縁体相転移とサブバンド構造

Anderson 局在のスケーリング理論は二次元系が常に絶縁的になることを予想しているが、高移動度の Si MOSFET で金属的な振る舞いが報告された。ここで、絶縁相、金属相は抵抗率の温度依存性から定義され、温度低下に伴って抵抗が増大する相を絶縁相、その逆を金属相とする。Anderson 局在のスケーリング理論によって禁止されている金属相の発現は、二次元系の低温における基底状態を完全に把握できていないことを意味しており、低次元系の物理の理解に向けて非常に重要な問題である。これまで面内磁場によるスピン分離に伴う金属相の破壊が報告されており、金属相の発現に対してスピン自由度が関与していることが指摘されていた。金属相の発現には、スピン自由度だけではなく、谷自由度も含めたサブバンド構造が重要であることが理論的に指摘されているが、これまでの Si 中二次元電子系では谷分離の操作が困難であったため、その検証はできていない。

本研究で用いた試料は谷分離を大幅に制御できる特徴を活かし、谷縮退度を操作しながら抵抗率の温度依存性を測定し、金属相の発現を調べた。谷偏極状態では最低温において金属相が破壊されることが分かった。これは谷自由度と金属相の関係についても、スピン自由度と金属相の間で考えられているロジックを適用できることを示している。

### 2) 垂直磁場下での二次元正孔系のサブバンド構造の閉じ込め電界依存性

Si 中の二次元正孔系には電子系の谷縮退のような縮退はないが、重い正孔、軽い正孔のような複雑なサブバンド構造に起因する、電子系では見られない多彩な物理現象がみられる。特に、正孔系は  $p$  軌道を有し、スピン軌道相互作用が電子系に比べて強いという特徴がある。このうち、Rashba スピン軌道相互作用は構造の空間反転対称性の破れに起因するスピン軌道相互作用で、二次元系に垂直に印加される電界に依存した有効磁場が発生し、それに伴うスピン分離が発生すると考えられている。Rashba スピン軌道相互作用は、ゲート電極から二次元系へ印加される電界を用いてスピン状態を操作できることを示している。スピン状態のゲート電圧による操作の理解は、物理的な重要性だけではなく、スピントランジスタ等の応用面でも注目されている。

電子系では狭ギャップ半導体において、Rashba 効果を介したゲート電圧による電子スピンの操作が報告されており、閉じ込め電界の強度に比例したスピン分離が観測されている。正孔系は  $p$  軌道を持つため、電子系に比べてスピン軌道相互作用の影響が強いと考えられる。GaAs 中の二次元正孔系においては Rashba スピン軌道相互作用を介した正孔スピンの操作が報告されているが、閉じ込め電界の増大に対してスピン分離が減少するような“負の Rashba スピン軌道相互作用”といった、InGaAs 中の電子系とは逆の振る舞いが報告されている。これは、正孔のバンド構造の複雑性に起因していると考えられている。ところが、応用面で重要な半導体である Si に関するこのような研究は少ない。

本研究で用いた試料は閉じ込め電界とキャリア密度を独立に制御でき、さらに絶縁膜が  $\text{SiO}_2$  であるため、閉じ込めポテンシャルや正孔密度に対する広範囲にわたる測定が可能となる。その特徴を活かし、二次元正孔系のサブバンド構造の閉じ込め電界依存性を測定するため、垂直磁場  $B_{\perp} = 6 \text{ T}$  を印加した状態での磁気抵抗測定を行い、Shubnikov-de Haas 振動の閉じ込め電界依存性を調べた。量子井戸が対称で、正孔系全体にかかる有効電界が 0 の場合は、奇数占有率に対応する抵抗率の極小が現れた。閉じ込め電界を増大させた時に Landau 準位構造が変化しなければ Shubnikov-de Haas 振動

の現れ方は変化しないはずであるが、閉じ込めポテンシャルの増大に伴って奇数占有率に対応する抵抗の極小点は消失し、偶数占有率に対応する抵抗の極小点が出現した。これは閉じ込め電界に対して正孔の Landau 準位構造が変調を受けていることに他ならない。この状況下において面内磁場を印加した際には、奇数占有率から偶数占有率へ変化する位置が、小さい閉じ込め電界によって起こることが観測された。これは、Si 中の二次元正孔系の Landau 準位構造の閉じ込め電界依存性は、狭ギャップ半導体中の二次元電子系等で見られた正の Rashba スピン軌道相互作用と同じであることが分かり、GaAs 中の二次元正孔系のような強い重い正孔-軽い正孔間相互作用による負の Rashba 効果は見られないことが分かった。

## 論文審査の結果の要旨

本研究では、Si/SiO<sub>2</sub> 量子井戸構造を Separation by IMplanted OXYgen (SIMOX) 技術を用いて作製し、さらに、オーミックコンタクトを工夫することで同じ量子井戸に電子あるいは正孔を導入して輸送特性を測定することが可能なデバイスを実現した。さらにフロントゲートとバックゲートを用いて量子井戸内の電界やキャリア分布を広範囲に制御することで、二次元電子系、正孔系のサブバンド状態がどのように制御されるかを研究した。

電子系では埋め込み酸化膜 (Buried Oxide: BOX) 側に電子を押し付けた時に表れる谷分離に着目した。28 T までの超強磁場中でスピン分離と谷分離を操作しながら、新たなサブバンドが占有される際に表れる抵抗の急峻な変化に着目して伝導特性を測定し、磁場と谷分離の組み合わせにより、スピン・谷縮退状態、スピン縮退・谷非縮退状態、スピン非縮退・谷縮退状態、スピン・谷非縮退状態と任意に制御できることを確認した。さらに、二次元系の基礎である金属・絶縁体転移に関して、金属相の発現に谷自由度が与える影響を検証し、谷偏極状態では最低温において金属相が破壊されることを確認した。これは谷自由度と金属相の関係においても、スピン自由度と金属相の間でこれまで考えられてきた議論が適用できることを示している。また、その発見以来、様々な観点から着目されてきた大きな谷分離に関しては、Si/SiO<sub>2</sub> 界面特性と関連付けてその起源を議論する重要な知見を得た。大きな谷分離については Si/SiO<sub>2</sub> 界面の急峻性との関連を示唆する理論が示されてきたが、谷分離の定量的な説明はできておらず、実験的にも不明な点が多かった。谷分離という要素があるために電子系の輸送特性だけから界面の特性を明らかにすることは不可能であり、本研究では、作製したデバイスの利点を活かして、同じ界面が谷分離のない正孔の輸送特性に及ぼす影響を調べた。その結果、BOX 側にキャリアを押し付けると、電子系では過去に報告されているような移動度の抑制が見られたが、正孔系では表面酸化膜側に押し付けた時に比べむしろ移動度が増加することが確認された。これは BOX 側の界面で表面ラフネス散乱が少ないことを示しており、そのような界面で電子系の谷分離が増幅され、谷分離自体によって電子移動度が抑制されていることを示している。

さらに、閉じ込めポテンシャルが任意にしかも大きく変えられる Si 量子井戸構造の特徴を二次元正孔系のサブバンド構造の閉じ込めポテンシャル依存性の研究に拡張した。垂直磁場  $B_{\perp} = 6$  T 印加した時のシュブニコフ・ド・ハース振動を調べ、閉じ込めポテンシャルが対称な場合は奇数の占有率に対応するところに抵抗の極小が表れるが、閉じ込めポテンシャルの非対称性を増すとそれが消失し、偶数占有率に起因する抵抗極小が表れることを発見した。これはポテンシャル閉じ込めに対して正孔のランダウ準位構造が変調を受けていることに他ならない。Si の正孔系でスピン軌道相互作用に基づくと考えられるサブバンド操作が確認されたことは、物性物理のみならずスピントロニクスデバイスへの応用面でも大変重要な成果である。

以上の研究成果は自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。したがって、新井田佳孝提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。